Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 2, 2024, p. 163-176

Simulation of Natural Frequencies of Orange Fruit Using Finite Element Method

V. Kahrizi[1], E. Ahmadi[1*], A. R. Shoshtari[2]

1- Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
(*- Corresponding Author Email: eahmadi@basu.ac.ir)

Received: 13 December 2022 Revised: 16 April 2023 Accepted: 24 April 2023 Available Online: 24 April 2023	**How to cite this article:** Kahrizi, V., Ahmadi, E., & Shoshtari, A. R. (2024). Simulation of Natural Frequencies of Orange Fruit Using Finite Element Method. *Journal of Agricultural Machinery, 14*(2), 163-176. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.80039.1137

Introduction

The growing consumer demand for high-quality products has led to the development of new technologies for assessing the quality of agricultural products. Iran is the 9th largest orange producer in the world. Every year, large quantities of agricultural products lose their optimal quality due to mechanical and physical damage during various operations such as harvesting, packaging, transportation, sorting, processing, and storage. This study is performed to identify the natural frequencies and vibration modes of the Thomson orange fruit using finite element modal analysis by ANSYS software. In addition, physical properties including mass, volume, density, and principal dimensions were measured, and mechanical properties were determined using Instron Texture Profile Analysis. The dynamic behavior of the orange fruit was simulated using the pendulum impact test. Afterward, the obtained impact was applied to the orange fruit by force gauge and three-axis accelerometer sensors in both polar and equatorial directions. The three-dimensional geometric model of the orange fruit was drawn in the ANSYS software. After meshing and applying the boundary conditions, the first 20 modes and corresponding natural frequencies were obtained. Since the objective of this study was to identify the natural frequencies of the orange fruit, it was considered to have free movement and rotation in space. The results showed that the natural frequencies of orange fruit are in the range of 0 to 248.41 Hz. Knowledge of the texture characteristics and dynamic behavior of horticultural products is essential for the design and development of agricultural machinery. Furthermore, the design and development of agricultural machinery are directly related to the biological properties of agricultural products.

Materials and Methods

The Thomson orange variety was used in the present study. The oranges used for the experiments were harvested from the Citrus and Subtropical Fruits Research Institute in Ramsar, Iran, located at coordinates 50° 40′ E and 36° 52′ N. The oranges were subsequently divided into two groups: large (average diameter 82 mm) and small (average diameter 66 mm). Conducting the finite element analysis requires knowledge of the physical and mechanical properties of the flesh and skin of the orange fruit. The physical and mechanical properties of the tested samples include geometric dimensions, modulus of elasticity, Poisson’s ratio, and density. In the present study, the dynamic behavior of the orange fruit under dynamic loads was investigated by performing an impact test using a pendulum. The orange fruit was hung from the ceiling using a thin thread to perform experimental tests and extract the modal parameters. The orange samples were subjected to impact at three angles: 7° (below the yield point), 10° (at the dynamic yield point), and 20° (above the dynamic yield point).

Results and Discussion

The comparison of the experimental (laboratory) natural frequencies and simulation validates the simulation results. The experimental natural frequencies of the first, second, and third modes in the large-group oranges are

https://doi.org/10.22067/jam.2023.80039.1137

125.4, 146.9, and 180.4 Hz, respectively. Additionally, the simulation (modal) frequencies are 133.80, 146.16, and 196.66 Hz for the first three modes, respectively. The lowest and the highest differences were observed in the second (0.5%) and third (9.01%) modes, respectively. In the small-group oranges, the first, second, and third modes have experimental natural frequencies of 152.2, 188.8, and 242.2 Hz, respectively, and simulation frequencies are 167.79, 187.50, and 248.30 Hz. The second and first modes exhibited the smallest and largest disparities between experimental and simulated natural frequencies, respectively, at 0.68% and 10.24%.

Conclusion

While there are certain limitations, it is undeniable that Computer Aided Engineering (CAE) applications are advantageous for predicting the natural frequencies and vibration modes of spherical fruits such as oranges. Utilizing the obtained frequencies, especially the resonance frequency and the vibrational mode shape, enables us to avoid the resonance frequency in the actual transportation of oranges. This is possible through the implementation of suitable packaging and transportation methods, thereby mitigating the deterioration of fruit quality and ensuring an accurate prediction of its shelf life.

Keywords: Dynamic Behavior Modeling, Modal Analysis, Vibration modes

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۱۷۶-۱۶۳

شبیه‌سازی فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال با استفاده از روش اجزای محدود

وحید کهریزی[۱]، ابراهیم احمدی[۲*]، علی‌رضا شوشتری[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴

چکیده

سالانه مقادیر زیادی از محصولات کشاورزی در اثر بارهای دینامیکی و سایر آسیب‌های مکانیکی که از طرف اجزای متحرک ماشین‌ها هنگام برداشت، حمل و نقل، انبار کردن و بسته‌بندی به آن‌ها وارد می‌شود از بین می‌روند یا دچار افت کیفیت می‌شوند. این در حالی است که تاکنون بیشتر تحقیق‌های انجام‌شده برای تجزیه و تحلیل عملیات‌های مذکور با آزمون‌های عملی همراه بوده است و نتایج آن فقط در شرایط خاص می‌تواند مورداستفاده قرار گیرد. هدف از این مطالعه شناسایی فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی در میوه پرتقال رقم تامسون با استفاده از روش آنالیز مودال اجزای محدود می‌باشد. به‌منظور شبیه‌سازی رفتار دینامیکی میوه پرتقال از آزمون پاندول به‌وسیله حسگرهای نیروسنج و شتاب‌سنج سه‌محوره در دو راستای قطبی و استوایی به میوه پرتقال ضربه وارد شد. مدل هندسی سه‌بعدی میوه پرتقال در نرم‌افزار انسیس ترسیم شد و با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مشخص، خواص فیزیکی و مکانیکی پوست و گوشت میوه پرتقال تعیین گردید. پس از مرحله شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی، ۲۰ مود اول و فرکانس‌های طبیعی متناظر با آن به‌دست‌آمد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال در محدوده ۰ تا ۲۴۸/۴۱ هرتز می‌باشد. از نتایج این تحقیق می‌توان در طراحی ماشین‌های برداشت و بهینه‌سازی مکانیزم‌های پس از برداشت و حمل و نقل به‌منظور کاهش ضایعات استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز مودال، مدل‌سازی رفتار دینامیکی، مودهای ارتعاشی

مقدمه

امروزه افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصول با کیفیت بالا، منجر به توسعه فن‌آوری‌های جدید برای ارزیابی کیفی محصولات کشاورزی شده‌است. مرکبات ازجمله محصولات باغی می‌باشد که از جایگاه ویژه‌ای در زمینه اشتغال و ارزآوری برخوردار هستند و علاوه بر مصارف تازه‌خوری در صنعت فرآوری و تولید آب میوه نیز استفاده می‌شود. سالانه مقدار زیادی از محصولات کشاورزی در اثر عدم شناخت کافی از ویژگی فیزیکی و مکانیکی محصولات در عملیات مختلف از جمله برداشت، حمل و نقل و بسته‌بندی از بین می‌روند (Chen & Opara, 2013). امروزه روش‌های تحلیلی به‌وسیله کامپیوتر، کمک شایانی در شناخت خواص فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی کرده‌اند. افزایش توانمندی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری به مهندسان اجازه می‌دهد مسائل پیچیده را با فناوری طراحی به کمک کامپیوتر و روش‌های عددی به‌صورت مجازی بدون ساخت فیزیکی و انجام آزمایش حل کنند. از آن‌جا که برداشت، بسته‌بندی، درجه‌بندی و فرآوری مرکبات در بیشتر کشورهای پیشرفته به‌صورت مکانیزه می‌باشد، اهمیت و توسعه آن در ایران با توجه به تولید و سطح زیر کشت، حائز اهمیت می‌باشد. تلاش‌های بسیاری در چند دهه گذشته برای به‌کار گرفتن شیوه‌های نوین برای کنترل کیفی غیرمخرب محصولات کشاورزی انجام شده است. این روش‌ها مبتنی بر یافتن ویژگی‌های مکانیکی و رفتار دینامیکی مرتبط با شاخص‌های رسیدگی محصولات می‌باشد. روش‌های مورداستفاده برای به‌دست‌آوردن کیفیت میوه، توسط آزمون‌های غیرمخرب امروزه جایگاه ویژه‌ای در فرآوری محصولات کشاورزی پیدا کرده‌اند (Mizrach, 2007). تاکنون چندین گزارش علمی در مورد روش آنالیز مودال اجزای محدود در مورد میوه‌هایی مثل هندوانه، طالبی، گلابی، سیب، گوجه‌فرنگی و قهوه ارائه شده است (Abbaszadeh *et al.*, 2014; Seyedabadi,

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۳- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: eahmadi@basu.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.80039.1137

Khojastehpour, & Sadrnia, 2015; Celik, 2017; Celik, Rennie, & Akinci, 2011; Kabas, Celik, Ozmerzi, & Akinci, 2008; Salarikia, Miraei Ashtiani, Golzarian, & Mohammadinezhad, 2017; Yousefi, Farsi, & Kheiralipour, 2016; Tinoco, Ocampo, Pena, & Sanz-Uribe, 2014).

به‌طور کلی، محققان با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی مکانیکی، با استفاده از روش اجزای محدود، تحقیقاتی را برای تعیین ویژگی‌های مودال سیستم‌های بیولوژیکی انجام داده‌اند (Villibor, Santos, Queiroz, Khoury Junior, & Pinto, 2019; Tinoco & Pe˜na, 2018; Coelho, Santos, Queiroz, & Pinto, 2016; Santos, Queiroz, Valente, & Coelho, 2015; Tinoco *et al.*, 2014; Gao, Song, & Rao, 2018). با همه‌ی ویژگی‌های شبیه‌سازی، طراحان زیادی از گذشته تا به حال تمام عزم خود را جزم نموده‌اند که شبیه‌سازی خود را به واقعیت نزدیک‌تر، دقت طراحی بالاتر، بازده بالاتر و عملکرد بهینه‌تری را طراحی کنند. همواره تحقیقات متعددی با روش تحلیل المان محدود برروی محصولات مختلف کشاورزی موجود می‌باشد، اما اغلب تحقیقاتی که در زمینه تحلیل خواص مکانیکی محصولات کشاورزی به‌وسیله روش المان محدود انجام گرفته‌شده بر روی میوه‌هایی چون سیب و گلابی بوده است (Gyeong-Won, Gab-Soo, & Yasuyuki, 2008; Lu, Srivastava, & Ababneh, 2006).

بدون پایگاه داده از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی، مهندسان و طراحان باید با استفاده از روش‌های تجربی به طراحی ماشین‌های کشاورزی و تجهیزات بپردازند که این امر از لحاظ زمان و هزینه ناکارآمد است. ضربه مکانیکی، به‌عنوان یک عامل مهم باعث خسارت محصولات کشاورزی در هنگام برداشت و پس از برداشت شناخته شده است. با توجه به گسترش دانش کامپیوتری و در دسترس بودن این فناوری می‌توان برای حل مسائل پیچیده با استفاده از طراحی به کمک کامپیوتر[1] بدون نیاز به واقعیت فیزیکی، آن را شبیه‌سازی کرد (Celik *et al.*, 2011). با این حال شبیه‌سازی رفتار میوه پرتقال با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود تحت بار دینامیکی ضربه گزارش نشده است. به کمک نتایج به‌دست‌آمده از آزمون مودال می‌توان صحت طراحی و ساخت تجهیزات را بررسی و در صورت نیاز جهت بهینه‌سازی و بهبود آن‌ها اقدام نمود. همچنین می‌توان نحوه عملکرد سیستم به‌ازای نیروهای مختلف که ممکن است در شرایط کاری پیش بیایند را پیش‌بینی و از وقوع پدیده‌های مخرب همچون تشدید پیشگیری نمود. رزونانس[2] یا تشدید زمانی اتفاق می‌افتد که فرکانس تحریک خارجی با فرکانس طبیعی سیستم یکسان شود. اگر یک سیستم در معرض ارتعاش اجباری خارجی قرار گیرد و فرکانس ارتعاش اجباری خارجی با فرکانس طبیعی آن برابر باشد، رزونانس اتفاق می‌افتد. پس از آن دامنه ارتعاش سیستم به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. پدیده رزونانس می‌تواند به سیستم آسیب جدی رسانده و عمر آن را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. بنابراین ضروری است که پارامترهای دینامیکی میوه پرتقال را به‌منظور طراحی ماشین‌های برداشت، حمل و نقل، درجه‌بندی و بسته‌بندی به‌دست آورد و شبیه‌سازی نمود.

مواد و روش‌ها

مبانی آنالیز مودال تجربی

به‌طور کلی رفتار دینامیکی یک سیستم جرم- فنر و میراکننده به‌وسیله معادله حرکت دیفرانسیل خطی مرتبه دوم به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، $X(t)$ بردار جابه‌جایی به‌عنوان تابعی از زمان، M ماتریس جرم یا ماتریس اینرسی، C ماتریس میرایی، K ماتریس سفتی سیستم و $F(t)$ بردار نیروی اعمال‌شده به‌عنوان تابعی از زمان می‌باشد. از این معادله فرکانس‌های طبیعی سیستم در حوزه خطی الاستیک به‌دست می‌آید. مدل مودال به‌وسیله ماتریسی از توابع پاسخ فرکانسی $H(\omega)$ که به‌وسیله نسبت سیگنال پاسخ $\dot{X}(\omega)$ به سیگنال ورودی $F(\omega)$ در حوزه فرکانسی محاسبه می‌شوند.

$$H(\omega) = \frac{\dot{X}(\omega)}{F(\omega)} \quad (۲)$$

در مرحله دوم، پارامترهای مودال با استفاده از روش‌های برآورد پارامتر غیرخطی استخراج می‌شوند. برآورد قطب‌ها (فرکانس‌ها و میرایی) در حوزه فرکانس به روش نمایی حداقل مربعات به‌دست می‌آیند. اگر $H(\omega)$ ماتریسی با n_i درجه آزادی ورودی و n_o درجه آزادی خروجی باشد، برای هر المان h_{ij} می‌توان نوشت.

$$h_{ij}(\omega) = \sum_{k=1}^{N}\left[\frac{r_{ijk}}{(j\omega-\lambda_k)} + \frac{r^*_{ijk}}{(j\omega-\lambda^*_k)}\right] \quad (۳)$$

رابطه مربوط به حوزه زمان به‌صورت رابطه (۴) می‌باشد.

$$h_{ij}(t) = \sum_{k=1}^{N}\left(r_{ijk}\,.\,e^{\lambda_k.t} + r^*_{ijk}\,.\,e^{\lambda^*_k.t}\right) \quad (۴)$$

در معادلات فوق، $h_{ij}(\omega)$ تابع پاسخ فرکانسی[3] بین پاسخ (یا خروجی) و مرجع (ورودی یا تحریک‌شده) و $h_{ij}(t)$ پاسخ پالسی[4] بین ورودی و خروجی می‌باشد. N تعداد مودهای ارتعاشی به‌منظور ساختار پاسخ دینامیکی است که در داخل محدوده فرکانسی شرکت می‌کنند. r_{ijk} مقدار باقی‌مانده برای مود K، r^*_{ijk} مزدوج مختلط[5] از مقدار باقی‌مانده از مود k، λ_k مقدار قطب برای مود k، λ^*_k مزدوج مختلط از

1- Computer aided design
2- Resonance

3- Frequency response function
4- Pulse response
5- Complex conjugate

مقدار قطب برای مود k می‌باشد.

قطب مود k می‌تواند به‌صورت رابطه (۵) بیان شود (Couck, Ketelaere, & Baerdemaeker, 2003).

$$\lambda_k = C_K + j\ .\ \omega_{dk} \quad (۵)$$

در رابطه (۵) قسمت حقیقی از قطب، C_K، مقدار میرایی از مود K می‌باشد. سیستم‌های فیزیکی همیشه مقدار میرایی منفی دارند زیرا بزرگی آن با زمان کاهش می‌یابد. قسمت موهومی از رابطه (۵)، ω_{dk}، بیانگر فرکانس طبیعی مستهلک‌شونده[1] از مود K می‌باشد. نسبت میرایی[2]، Z، نسبت میرایی به مقدار میرایی بحرانی است که با رابطه (۶) بیان می‌شود.

$$z = \frac{c}{c_{crit}} \times 100 \quad (۶)$$

فرکانس طبیعی میرا به‌صورت رابطه (۷) بیان می‌شود.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - Z^2} \quad (۷)$$

که ω_n فرکانس طبیعی نامیرا[3] و ω_d فرکانس طبیعی میرا بر حسب رادیان بر ثانیه ($rad\ s^{-1}$) می‌باشند.

هنگامی که فرکانس‌های طبیعی و مقادیر میرایی به‌دست آیند، ضرایب شکل مود یا باقیمانده می‌توانند با استفاده از روش دامنه فرکانس حداقل مربعات مشخص شوند. قطب‌ها، فرکانس‌های طبیعی، فاکتورهای میرایی، شکل‌های مود و باقیمانده معمولاً به‌عنوان پارامترهای مودال اشاره می‌شود و می‌توانند از آزمایش‌های دینامیکی حاصل شوند (Coucke *et al*., 2003).

تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های تجربی

پرتقال مورد استفاده در آزمایش‌ها واریته تامسون می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها تعداد معینی پرتقال از پژوهشکده مرکبات و میوه‌های نیمه‌گرمسیری واقع در شهرستان رامسر (در شمال کشور ایران) از توابع استان مازندران برداشت شد. برای جلوگیری از وارد آمدن هرگونه صدمه به میوه، برداشت به‌صورت دستی انجام شد و پرتقال‌ها به دقت در جعبه‌های پلاستیکی به‌صورت یک ردیفه جهت حمل به آزمایشگاه خواص مکانیکی و رئولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا قرار داده شدند. سپس میوه‌ها در یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس نگه‌داری شدند. پرتقال‌ها در دو دسته با اندازه‌های کوچک و بزرگ جداسازی شدند و قبل از انجام آزمایش‌ها پرتقال‌ها در دمای محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شدند تا با دمای محیط هم‌دما شوند.

تعیین خواص فیزیکی

مشخصات هندسی و خصوصیات فیزیکی شامل جرم، ابعاد (قطر بزرگ، قطر متوسط و قطر کوچک) و چگالی در محیط آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری جرم از ترازو دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم و برای اندازه‌گیری ابعاد پرتقال از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. چگالی از نسبت جرم نمونه در آب به اختلاف جرم نمونه در هوا و جرم نمونه در آب تعیین شد (Mohsenin, 1986).

در این تحقیق پرتقال‌های تامسون به دو گروه کوچک و بزرگ تقسیم شدند. از هر دسته، ۶۰ پرتقال برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی انتخاب شد. قطر متوسط نمونه‌های کوچک ۶۶ میلی‌متر، قطر متوسط نمونه‌های بزرگ ۸۲ میلی‌متر، ضخامت پوست میوه پرتقال ۳ میلی‌متر و جرم حجمی میوه پرتقال و پوست آن به‌ترتیب ۸۹۰ و ۹۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب اندازه‌گیری شدند.

تعیین خواص مکانیکی

آزمایش‌های مکانیکی بر روی گوشت و پوست میوه پرتقال با استفاده از دستگاه آنالیز بافت[4] اینسترون (Zowick/roell) مدل (Bbt1-Fro.5th.D14) مجهز به نیروسنج (مدل X Force Hp با ظرفیت ۵۰۰ نیوتن با مشخصه ۲ میلی‌ولت بر ولت) ساخت کشور آلمان موجود در آزمایشگاه گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا صورت گرفت. به‌منظور استخراج پارامترهایی از قبیل مدول یانگ، تنش تسلیم و نیروی شکست برای پوست و گوشت میوه پرتقال به‌عنوان برخی ورودی‌های مدل‌سازی المان محدود (به‌صورت الاستیک خطی) در نرم‌افزار انسیس استفاده شد. نمونه‌های مورد آزمایش به‌صورت کاملاً تصادفی انتخاب شدند. آزمایش پانچری[5] (نفوذی) به‌صورت جداگانه در ۱۰ تکرار با استفاده از پروب‌های استوانه‌ای ۱۱/۳۵ و ۴/۵ میلی‌متری و سرعت بارگذاری ۱۰میلی‌متر بر دقیقه به‌ترتیب برای گوشت و پوست میوه پرتقال انجام شد. آزمایش پانچری بر روی گوشت میوه پرتقال در راستای عرضی (قطر استوایی) انجام شد. منظور از بارگذاری عرضی در این آزمایش‌ها، هم‌راستا بودن بردار نیرو در جهت عمود بر محور طوقه و دم نمونه است.

آزمایش‌های پاندولی

در این پژوهش به‌منظور بررسی رفتار دینامیکی میوه پرتقال تحت بارهای دینامیکی از آزمون ضربه با استفاده از پاندول انجام شد. پاندول شامل بازویی به طول ۰/۵۵۷ متر با یک محفظه آلومینیومی شکاف‌دار برای قرارگیری حسگر نیروسنج و یک ضربه‌زن محدب شکل از جنس تفلون (با شعاع انحنای ۲۵ میلی‌متر) می‌باشد. این دستگاه مجهز به حسگرهای نیروسنج (PCB 208c02, PCB (Pizotronics, USA, sensitivity: 10.97 mV/N و شتاب‌سنج سه‌محوری پیزوالکتریک (PCB 356A26, PCB Pizotronics, USA, sensitivity: 50.1 mV/g (X), 50.6 mV/g (Y), 49.08 mV/g (Z)) می‌باشد که تحت زوایای مختلف با استفاده از ضربه‌زن

1- Damped natural frequency
2- Damping ratio
3- Undamped natural frequency

4- Texture Profile Analysis
5- Puncture

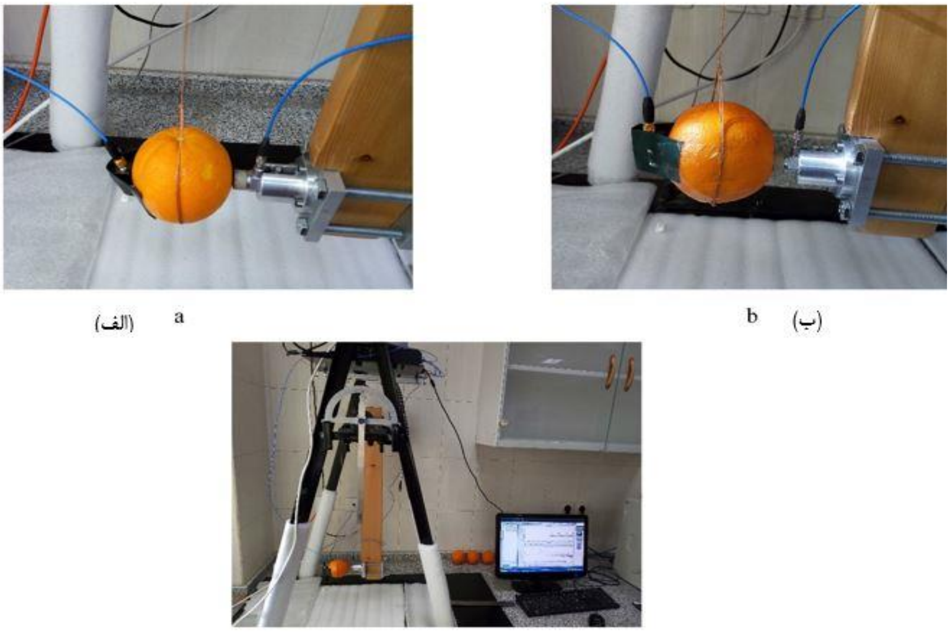
به پرتقال نیرو وارد شد و داده‌های نیروی برخورد و شتاب در راستای سه محور در مدت زمان اعمال ضربه با استفاده از دستگاه چهار کاناله پردازش سیگنال (ECON, AVANT Lite, model: MI-6004) استخراج گردید (Ahmadi & Barikloo, 2016 a, b). قبل از انجام آزمایش‌های پاندولی نقطه تسلیم دینامیکی برای نمونه‌های پرتقال تعیین گردید. بر اساس روش ضربه چندگانه با ارتفاع ثابت[1] (CHMI) برای تعیین نقطه تسلیم دینامیکی از منحنی نیرو- زمان استفاده شد. به این صورت که عدم تغییر در منحنی نیرو- زمان در یک انرژی ثابت با تکرارهای ضربه متوالی در یک نقطه روی محصول، نشان‌دهنده شروع نشدن تغییرشکل پلاستیک می‌باشد (Ahmadi & Barikloo, 2016 a, b). بنابراین با افزایش انرژی ضربه تحت یک زاویه مشخص و براساس روش سعی و خطا، نقطه تسلیم دینامیکی تحت زاویه ۱۰ درجه برای میوه پرتقال رقم تامسون تعیین گردید. به‌منظور انجام آزمایش‌های تجربی و استخراج پارامترهای مودال، میوه پرتقال مطابق شکل ۱ با استفاده از یک نخ از سقف آویزان شد. ضربه وارد بر نمونه‌های پرتقال تحت سه زاویه ۷، ۱۰ و ۲۰ درجه به‌ترتیب زیر نقطه تسلیم، نقطه تسلیم دینامیکی و بالای نقطه تسلیم دینامیکی وارد گردید. برای هرکدام از زوایای فوق در راستای قطبی و استوایی به نمونه‌های پرتقال نیرو (ورودی) وارد شد به‌طوری‌که دقیقاً در طرف مقابل نیروسنج، پاسخ دینامیکی توسط حسگر شتاب‌سنج سه‌محوره (خروجی) به دستگاه پردازش سیگنال ارسال و سپس در کامپیوتر ذخیره شدند. همواره تبدیل یک سیگنال از حوزه‌ای به حوزه‌ای دیگر ممکن است. استفاده از تبدیل فوریه و تبدیل معکوس آن، این امکان را می‌دهد که سیگنالی را از حوزه‌ی زمان به حوزه‌ی فرکانس و بالعکس، منتقل کرد. اما ملاحظاتی که در مورد میزان محاسبات، سهولت تفسیر داده و روش‌های کاهش نویز وجود دارد؛ انتخاب نهایی در مورد تبدیل سیگنال‌ها از یک حوزه به حوزه‌ای دیگر را روشن می‌کند. استفاده از توابع طیفی و به اصطلاح، کار در حوزه فرکانس بسیار ساده‌تر از کار در حوزه‌ی زمان است. دلیل این موضوع می‌تواند تجزیه سیگنال‌های پیچیده به قسمت‌های ساده‌تر جهت تسهیل در تحلیل آن‌ها و همچنین تبدیل عملگرهای کانولوشن[2] و معادلات دیفرانسیل در حوزه‌ی زمان به عملگرهای جبری در حوزه فرکانس باشد. از روش‌هایی که شناسایی را در حوزه فرکانس و با استفاده از توابع طیفی انجام می‌دهد می‌توان روش برگزینش قله[3] را به‌منظور تعیین فرکانس‌های طبیعی نام برد. به‌منظور استخراج پارامترهای مودال با استفاده از دستگاه چهارکاناله پردازش سیگنال (ECON, AVANT Lite, model: MI-6004)، ابتدا حسگرهای نیروسنج و شتاب‌سنج کالیبره شدند. نرخ نمونه‌برداری ۷۵۰ نمونه در ثانیه و ۲۰۴۸ داده در محدوده فرکانس صفر تا ۳۷۵ هرتز با فواصل فرکانسی ۰/۱۸۳ انجام شد. نوع پنجره[4] در دستگاه چهارکاناله پردازش سیگنال برای انجام آزمون‌های ضربه‌ای، هانینگ[5] انتخاب شد. همچنین انتقال داده‌ها از حوزه زمان به حوزه فرکانس، با استفاده از نرم‌افزار متلب[6] و همچنین کدنویسی در این نرم‌افزار و استفاده از تبدیل فوریه سریع[7] (FFT) می‌توان تمام مراحل شناسایی سیستم از وارد کردن داده‌ها، فیلترکردن آن‌ها، شناسایی سیستم و در نهایت نشان دادن پارامترهای مودال به‌دست‌آمده را در یک محیط گرافیکی برای پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک انجام داد. در این پژوهش هر آزمایش در ۵ تکرار انجام شد و در راستای قطبی (۲ سطح ضربه)، راستای استوایی (۲ سطح ضربه)، تحت زاویای ۷، ۱۰ و ۲۰ درجه (۳ سطح ضربه) نیرو به میوه پرتقال وارد گردید. تعداد کل آزمایش‌ها برای هرکدام از نمونه‌های کوچک و بزرگ میوه پرتقال که به‌صورت کاملاً تصادفی انتخاب می‌شدند در جدول ۱ ارائه شده است.

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار انسیس

به‌طور کلی، شبیه‌سازی اجزای محدود شامل سه مرحله می‌باشد که عبارتند از: پیش‌پردازش (ایجاد مدل هندسی سه‌بعدی، اختصاص خواص مواد به مدل سه‌بعدی، انتخاب نوع تحلیل، شبکه‌بندی مدل و تعیین شرایط مرزی مناسب)، پردازش (حل) و درنهایت پس از پردازش (تجسم نتایج محاسبه‌شده) (Entwistle, 2001). در مطالعه‌ای سلیک (Celik, 2017) و همچنین سالاری‌کیا و همکاران (Salarikia *et al.*, 2017) یک مدل هندسی از کل میوه به‌منظور محدود کردن عدم قطعیت‌های ناشی از خواص هندسی نامنظم از سلول‌ها برای بافت پوست و گوشت پیشنهاد کردند. خطاهای رایج در المان محدود می‌تواند ناشی از عدم قطعیت‌های انتخاب نوع المان، شکل هندسی، خواص ماده و شرایط مرزی باشد (Celik, 2017; Fadiji, Coetzee, Berry, & Opara, 2019). ابتدا در ماژول مودال نرم‌افزار انسیس پس از ایجاد مدل هندسی سه‌بعدی، خواص میوه پرتقال برای پوست و گوشت میوه تعریف شد. در این پژوهش مطابق مقاله جیاسی و همکاران (Gyasi, Fridley, & Chen, 1981) نسبت پواسون برای گوشت و پوست میوه پرتقال به‌ترتیب ۰/۴۴۹ و ۰/۳۴۰ در نظر گرفته شد. سپس در محیط طراحی نرم‌افزار انسیس، مدل هندسی سه‌بعدی طراحی شد (قطر گوشت میوه پرتقال در گروه بزرگ و کوچک به‌ترتیب ۷۶ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر و همچنین ضخامت پوست میوه پرتقال ۳ میلی‌متر اندازه‌گیری شد).

1- Constant-Height Multiple-Impact technique
2- Convolution
3- Peak picking
4- Window Type
5- Hanning
6- Matlab
7- Fast Fourier Transform

پس از تعریف ماده و ایجاد مدل هندسی سه‌بعدی، مرحله شبکه‌بندی می‌باشد. با توجه به این‌که ویژگی‌های المان‌ها در تحلیل المان محدود تاثیر زیادی دارد، باید شبکه‌بندی با اندازه و انواع مختلف المان انجام شود. به‌منظور انجام آنالیز مودال، در مرحله شبکه‌بندی آنالیز حساسیت انجام شد. با افزایش یا کاهش اندازه شبکه، نتایج خروجی آنالیز مودال اجزای محدود که همان فرکانس‌های طبیعی می‌باشند تغییر چندانی نداشت (استقلال از شبکه برای نتایج خروجی). بنابراین بهترین حالت ممکن به لحاظ کمترین زمان حل و بهترین جواب برای گوشت و پوست میوه پرتقال به‌صورت جداگانه، شبکه‌بندی از نوع تتراهدرال (المان هرمی چهار وجهی) به‌ترتیب با اندازه‌های ۵ و ۴/۵ میلی‌متری در نظر گرفته شد (شکل ۲).



(الف) a — (ب) b — (ج) c

شکل ۱– آزمایش پاندولی برای نمونه‌های پرتقال: (الف) راستای قطبی، (ب) راستای استوایی و ج) دستگاه آزمون پاندولی و حسگرهای نیرو و شتاب‌سنج سه‌محوره

Fig.1. Pendulum test of orange samples: (a) Polar direction, (b) Equatorial direction, and (c) Pendulum impact test setup, force sensor, and three-axis accelerometer sensor

تعداد گره‌ها و المان‌ها در میوه پرتقال در گروه بزرگ برای گوشت به‌ترتیب ۲۲۸۴۲ و ۱۵۸۸۹ و تعداد گره‌ها و المان‌ها برای پوست میوه پرتقال به‌ترتیب ۱۳۱۵۷ و ۶۶۸۵ به‌دست آمد (جدول ۲). همچنین تعداد گره‌ها و المان‌ها در میوه پرتقال در گروه کوچک برای گوشت به‌ترتیب ۱۱۶۷۸ و ۷۹۴۲ و تعداد گره‌ها و المان‌ها برای پوست میوه پرتقال به‌ترتیب ۸۵۲۸ و ۴۳۵۵ به‌دست آمد (جدول ۳). در نرم‌افزار انسیس جهت ایجاد تماس بین گوشت و پوست میوه پرتقال برای یکپارچه شدن آن‌ها به‌منظور به‌دست‌آوردن فرکانس‌های مودال، از تماس نوع به‌هم‌چسبیده[1] به‌صورت متقارن استفاده شد که نتایج رضایت‌بخشی مشاهده شد. در صورت عدم تعریف تماس بین گوشت و پوست میوه پرتقال در هنگام شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس، دوازده مود اول صفر می‌شوند که این ناشی از حرکت آزاد هرکدام از دو جسم (گوشت و پوست) می‌باشد که برای هر جسم به‌صورت جداگانه شش درجه آزادی به اشتباه در نظر گرفته شده است. بنابراین بین گوشت و پوست میوه پرتقال به اندازه ۰/۰۱ میلی‌متر تماس ایجاد شد که پوست میوه پرتقال به‌عنوان جسم هدف[2] و گوشت میوه پرتقال به‌عنوان جسم تماس[3] در نظر گرفته شد (جدول ۲).

به‌منظور بررسی استقلال از شبکه، نمودار فرکانس مود اول برحسب تعداد المان‌ها در سه حالت با اندازه المان‌های (گوشت ۵ mm و پوست ۴/۵ mm)، (گوشت ۴ mm و پوست ۳/۵ mm)، (گوشت ۳mm و پوست ۲/۵ mm) به‌ترتیب با تعداد المان‌های ۲۲۵۷۴، ۴۲۹۳۷ و ۱۱۱۵۸۸ برای یک گروه از پرتقال‌ها (گروه بزرگ) در شکل ۳ مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، بهترین حالت

1- Bonded

2- Target Bodies

3- Contact Bodies

ممکن به لحاظ کمترین زمان حل و بهترین جـواب تعـداد المان‌هـای ۲۲۵۷۴ با اندازه المان ۵ mm برای گوشت و ۴/۵ mm بـرای پوسـت انتخاب شد.

جدول ۱- مقادیر مربوط به تعداد آزمایش‌ها

Table 1- Number of the conducted tests

نمونه مورد آزمایش Sample	راستای قطبی Polar direction	راستای استوایی Equatorial direction	نیرو Force	تعداد تکرار Replicates	تعداد کل آزمایش‌ها Total number of tests
بزرگ (Large)	2	2	3	5	60
کوچک (Small)	2	2	3	5	60

جدول ۲- پارامترهای مشخص‌کننده خصوصیات مش FEM از هندسه اعمال‌شده در مدل برای پرتقال‌های گروه بزرگ

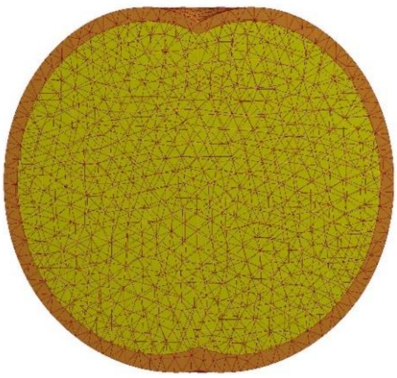
Table 2- Parameters characterizing the properties of the FEM mesh of each geometry applied in the model for large group oranges (group A)

Part	نوع المان Element type	اندازه المان Element size (mm)	تعداد گره‌ها Number of nodes	تعداد المان Number of elements	نوع تماس Contact type	تماس بخش‌ها Contact between the parts (mm)
گوشت Flesh	3D Tetrahedrons	5	22842	15889	Bonded (به‌هم‌چسبیده)	0.01
پوست Skin	3D Tetrahedrons	4.5	13157	6685	Bonded (به‌هم‌چسبیده)	

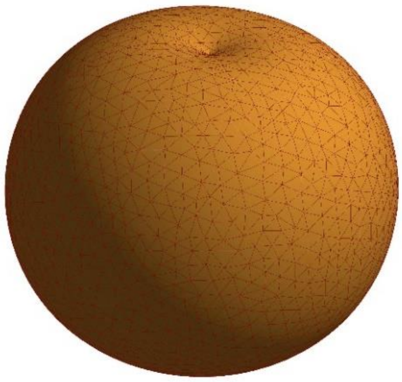
جدول ۳- پارامترهای مشخص‌کننده خصوصیات مش FEM از هندسه اعمال‌شده در مدل برای پرتقال‌های گروه کوچک

Table 3- Parameters characterizing the properties of the FEM mesh of each geometry applied in the model for small group oranges (group B)

Part	نوع المان Element type	اندازه المان Element size (mm)	تعداد گره‌ها Number of nodes	تعداد المان Number of elements	نوع تماس Contact type	تماس بخش‌ها Contact between the parts (mm)
گوشت Flesh	3D Tetrahedrons	5	11678	7942	Bonded (به‌هم‌چسبیده)	0.01
پوست Skin	3D Tetrahedrons	4.5	8528	4355	Bonded (به‌هم‌چسبیده)	



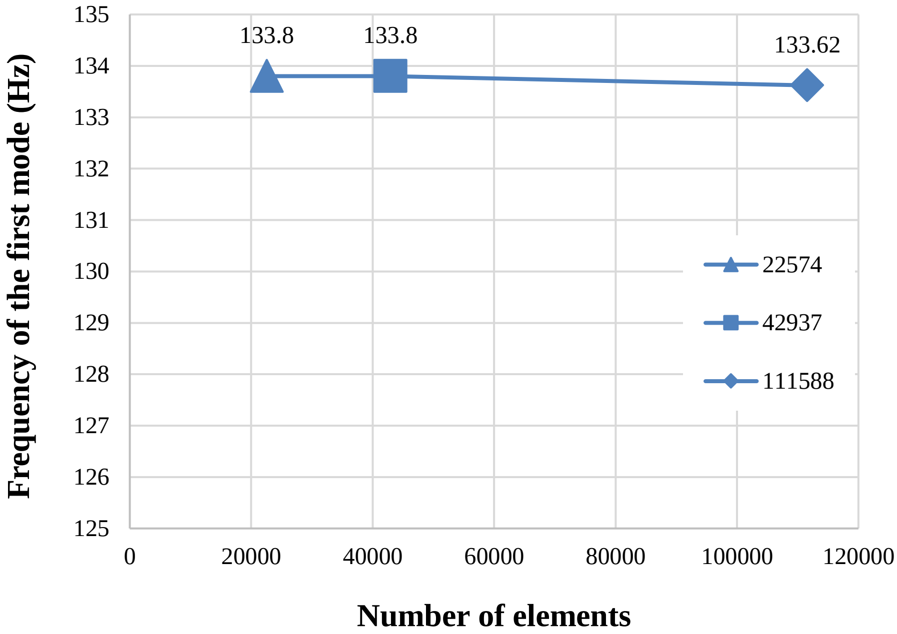
b ب



a الف

شکل ۲- شبکه سه‌بعدی تتراهدرال؛ (الف) میوه پرتقال کامل، (ب) نیم‌رخ میوه پرتقال

Fig.2. 3D tetrahedral mesh; (a) Whole orange fruit, (b) Orange fruit section cut showing the flesh and the skin



شکل ۳– نمودار فرکانس مود اول برحسب تعداد المان‌ها جهت تعیین استقلال از شبکه

Fig.3. Frequency diagram of the first mode with different number of elements to determine independence from the mesh size

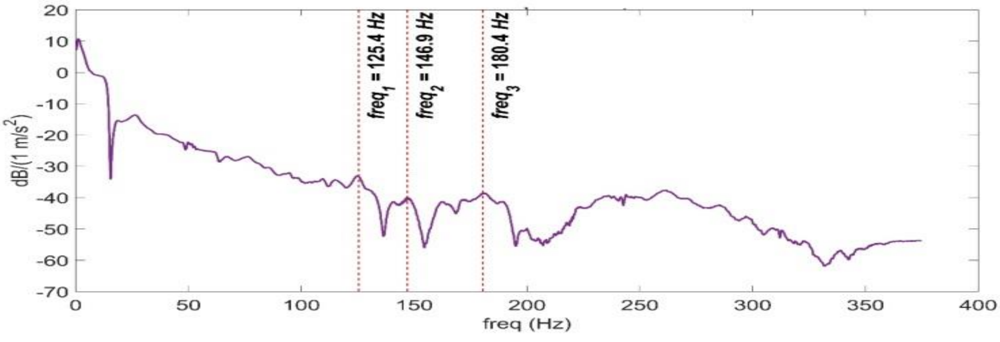
نتایج و بحث

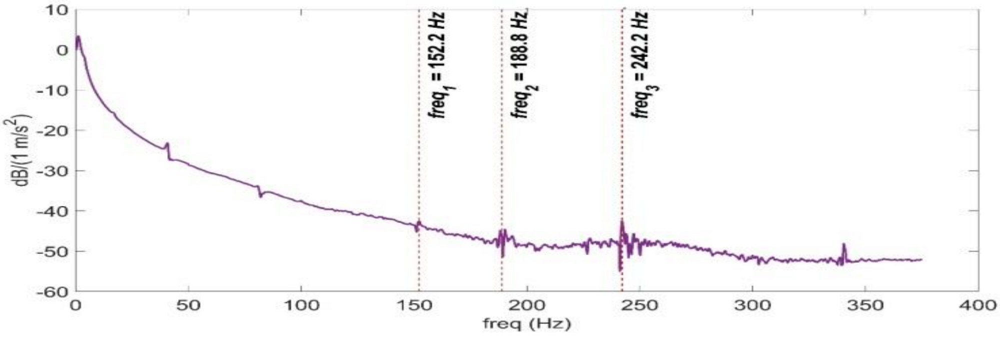
حداکثر و حداقل نیروی ضربه در میوه پرتقال گروه بزرگ در موقعیت قطبی و بالای نقطه تسلیم دینامیکی (Fmax = 26.17 N, Fmin = 2.180 N) و همچنین برای پرتقال‌های گروه کوچک (Fmax =7.235 N, Fmin = 0.930 N) در موقعیت قطبی و نقطه تسلیم دینامیکی می‌باشد.

در ابتدای لحظه برخورد پاندول (t= 0.0053 ms)، بیشترین نیرو به میوه پرتقال وارد شده است. این نتایج با نتایج نامداری قراقانی و همکاران مطابقت دارد (Namdari Gharaghani, Maghsoudi, & Mohammadi, 2020). برای تعیین فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال به‌وسیله آزمون تجربی، داده‌های خروجی از نمونه‌های تحریک‌شده توسط دستگاه چهارکاناله پردازش سیگنال (ECON, AVANT Lite, model: MI-6004) ثبت شد و سپس با استفاده از تبدیل فوریه سریع در نرم‌افزار متلب، نتایج از حوزه زمان به حوزه فرکانس انتقال داده شد. فرکانس‌های طبیعی آزمون تجربی نمونه‌ها مطابق شکل ۴ برای پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک استخراج گردید. براساس مطالعه لانگ (Láng, 2006)، پارامترهای مودال اساس تحلیل‌های مهندسی به‌منظور طراحی ماشین‌های برداشت و به‌ویژه ماشین‌های ارتعاشی هستند. همان‌طور که در شکل ۳ پیداست نقاط قله در این نمودارها به‌ترتیب بیانگر مودهای اول، دوم و سوم می‌باشند. در پرتقال‌های گروه بزرگ (شکل ۴–الف) اولین مود ارتعاشی توسط دستگاه چهارکاناله پردازش سیگنال در فرکانس طبیعی ۱۲۵/۴Hz حس شده و مود دوم نسبت به مود اول با ۱۷٪ و همچنین مود سوم نسبت به مود دوم با ۲۲٪ افزایش تغییرات به‌ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی ۱۴۶/۹ و ۱۸۰/۴Hz می‌باشند. همچنین در پرتقال‌های گروه کوچک (شکل ۴–ب) اولین مود ارتعاشی در فرکانس طبیعی ۱۵۲/۲Hz حس شده و مود دوم نسبت به مود اول با ۲۴٪ و مود سوم نسبت به مود دوم با ۲۸٪ افزایش تغییرات به‌ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی ۱۸۸/۸ و ۲۴۲/۲ Hz می‌باشند.

در هر دو گروه پرتقال‌های کوچک و بزرگ روند تغییرات در فرکانس‌های طبیعی آن‌ها به‌صورت صعودی می‌باشد. فرکانس طبیعی در یک سیستم یک درجه آزادی به‌صورت تئوری از رابطه $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$ به‌دست می‌آید. باتوجه به این‌که در پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک، سفتی نمونه‌ها[1]، K، دارای مقدار یکسانی می‌باشند و فرکانس طبیعی با متوسط جرم نمونه‌ها نسبت عکس دارد، بنابراین فرکانس طبیعی پرتقال‌های گروه کوچک از فرکانس طبیعی پرتقال‌های گروه بزرگ بیشتر است. به‌منظور به‌دست آوردن فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای متناظر با هریک از فرکانس‌های طبیعی با استفاده از ماژول مودال نرم‌افزار انسیس، ۲۰ مود اول به‌دست آمدند.

1- Sample stiffness





شکل ٤- سیگنال حس‌شده توسط دستگاه چهارکاناله پردازش سیگنال و انتقال آن به نرم‌افزار متلب و استفاده از تبدیل فوریه سریع؛ الف- پرتقال گروه بزرگ، ب- پرتقال گروه کوچک

Fig.4. The experimental values of the first three modes converted from time to frequency domain for the two groups of oranges; (a) Large and (b) Small

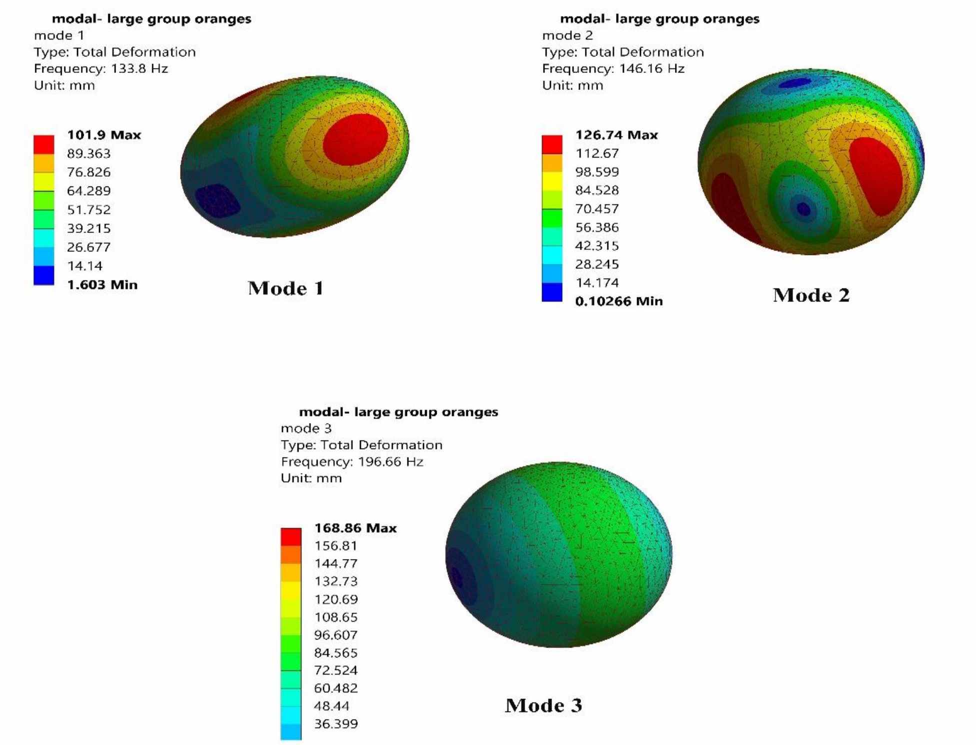
در هر دو گروه کوچک و بزرگ، فرکانس طبیعی ۶ مود اول تقریباً صفر می‌باشند (سه فرکانس اول مربوط به حرکت در راستای محورهای مختصات و سه فرکانس دوم مربوط به حرکت چرخشی حول محورهای مختصات می‌باشد) که این نشان‌دهنده این است که طراحی به‌درستی صورت گرفته است چراکه میوه پرتقال به‌صورت کاملاً آزاد در نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی شده است. باتوجه به این‌که در مرحله شبکه‌زنی در نوع و اندازه شبکه دقت و حساسیت خوبی صورت گرفته است (استقلال از شبکه برای نتایج خروجی)، فرکانس‌های طبیعی مودهای هفتم تا یازدهم در پرتقال‌های گروه بزرگ Hz ۱۳۳/۸۰ (به‌عنوان مود اول)، مود دوازدهم تا شانزدهم Hz ۱۴۶/۱۶ (به‌عنوان مود دوم) و فرکانس‌های طبیعی مودهای هفدهم تا نوزدهم Hz ۱۹۶/۶۶ به‌عنوان مود سوم در نظر گرفته شد. همچنین در پرتقال‌های گروه کوچک فرکانس‌های طبیعی مودهای هفتم تا یازدهم Hz ۱۶۷/۷۹ (به‌عنوان مود اول)، مود دوازدهم تا شانزدهم Hz ۱۸۷/۵۰ (به‌عنوان مود دوم) و فرکانس‌های طبیعی مودهای هفدهم تا نوزدهم Hz ۲۴۸/۳۰ به‌عنوان مود سوم در نظر گرفته شد (جدول ۴). نتایج این تحقیق با نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه وانگ و همکاران (Wang, Ma, Wei, Zhang, & Zhang, 2017) و ژانگ و همکاران (Zhang, Wu, Zhao, & Wang, 2018) مطابقت دارد. همان‌طور که از شکل مودها پیداست در هر دو گروه میوه پرتقال، مود اول به‌صورت مود طولی، مود دوم به‌صورت مود پیچشی و مود سوم به‌صورت مود خمشی می‌باشد.

جدول ٤- فرکانس‌های طبیعی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی پرتقال‌های گروه بزرگ (Group A) و گروه کوچک (Group B) با استفاده از نرم‌افزار انسیس

Table 4- Natural frequencies (Hz) obtained from simulation of large (Group A) and small (Group B) oranges using ANSYS software

Stage	Group A (Hz)	Group B (Hz)
Mode1	133.80	167.79
Mode2	146.16	187.5
Mode3	196.66	248.30

در مطالعه‌ای، میرزایی و همکاران (Mirzaei, Minaei, Khoshtaghaza, & Borghei, 2013) گزارش کردند که چگالی، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون فاکتورهای تاثیرگذاری بر روی مقادیر فرکانس‌های طبیعی هستند. اگرچه مطالعات زیادی بر روی فرکانس‌های طبیعی محصولات کشاورزی انجام نشده است، اما مقایسه نتایج با برخی از کارهای تحقیقاتی روی میوه سیب (Mirzaei *et al.*, 2013) و میوه گلابی (Song, Wang, & Li., 2006; Zhang *et al.*, 2018) انجام شد و تقریباً رفتار مشابهی مشاهده شد. به‌منظور اعتبارسنجی فرکانس‌های طبیعی تجربی (آزمایشگاهی) و شبیه‌سازی (آنالیز مودال)، مقایسه بین این فرکانس‌ها نشان داد که در پرتقال‌های گروه بزرگ مودهای اول، دوم و سوم به‌ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی تجربی ۱۲۵/۴، ۱۴۶/۹ و ۱۸۰/۴ Hz و همچنین فرکانس‌های شبیه‌سازی ۱۳۳/۸۰، ۱۴۶/۱۶ و ۱۹۶/۶۶ Hz می‌باشند که کمترین اختلاف در مود دوم (۰/۵٪) و بیشترین اختلاف در مود سوم (۹/۰۱٪) مشاهده گردید. همچنین در پرتقال‌های گروه کوچک مودهای اول، دوم و سوم به‌ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی تجربی ۱۵۲/۲، ۱۸۸/۸ و ۲۴۲/۲ Hz و فرکانس‌های شبیه‌سازی ۱۶۷/۷۹، ۱۸۷/۵۰ و ۲۴۸/۳۰ Hz می‌باشند که کمترین و بیشترین اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی تجربی و شبیه‌سازی در مودهای دوم و اول به‌ترتیب ۰/۶۸٪ و ۱۰/۲۴٪ مشاهده شد. در شکل‌های ۵ و ۶ سه مود اول به‌ترتیب برای پرتقال‌های تامسون گروه بزرگ و کوچک نمایش داده شده است.

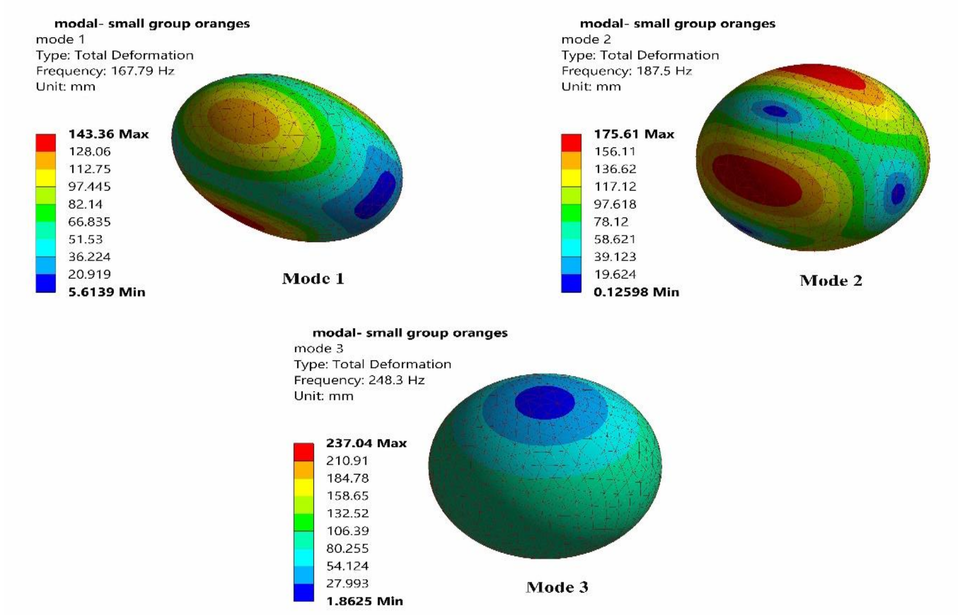


شکل ۵– سه مود اول در پرتقال تامسون گروه بزرگ با استفاده آنالیز مودال اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس

Fig.5. The first three modes in large Thomson oranges (Group A) using finite element modal analysis in Ansys software

طبق رابطه تنش خمشی حول یک محور $\sigma = \frac{MC}{I}$، بدیهی است که هرچه‌قدر فاصله از محور خمش (تار خنثی) بیشتر شود، تنش و درنتیجه کرنش و مقدار جابه‌جایی نیز بیشتر می‌گردند. چنین می‌توان نتیجه گرفت که بخش‌هایی که بیشترین فاصله را از تار خنثی داشته باشد بیشترین جابه‌جایی را دارد. مقادیر جابه‌جایی منفی برای تنش فشاری (ناحیه قرمز رنگ) و مقادیر جابه‌جایی مثبت مربوط به تنش کششی (ناحیه آبی رنگ) هستند (شکل‌های ۵ و ۶).

در صنعت قبل از ساخت قطعات مهندسی، برای تعیین جنس، آزمون‌های مودال به این منظور استفاده می‌شود که در بخش‌هایی که مقدار جابه‌جایی بیشتر می‌شود، جنس سازگارتری انتخاب کنند تا قطعات، عمر و کارکرد بیشتری داشته باشند (He & Fu, 2001). باتوجه به این نوع کاربرد آنالیز مودال، می‌توان در محصولات کشاورزی از این نکته استفاده کرد تا با اصلاح ژنتیکی محصولات کشاورزی به‌خصوص میوه‌ها، بافت آن‌ها را به گونه‌ای تغییر داد تا عمر مفید محصولات کشاورزی و میوه‌ها افزایش یابد.



شکل ٦– سه مود اول در پرتقال تامسون گروه کوچک با استفاده آنالیز مودال اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس

Fig.6. The first three modes in small Thomson oranges (Group B) using finite element modal analysis in Ansys software

نتیجه‌گیری

در این تحقیق ۲۰ فرکانس طبیعی اول و همچنین شکل مودهای متناظر آن با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود بر اساس پاسخ تحریک دینامیکی به‌وسیله آزمون پاندول (ضربه‌ای) برای میوه پرتقال رقم تامسون در دو گروه بزرگ و کوچک تعیین شدند. فرکانس طبیعی برای میوه پرتقال رقم تامسون توسط نرم‌افزار انسیس بر اساس پارامترهای ورودی (چگالی، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون) در محدوده ۰ تا Hz ۲۴۸/۴۱ به‌دست آمد. اگرچه محدودیت‌هایی وجود دارد، اما می‌توان پذیرفت که طراحی به کمک کامپیوتر در پیش‌بینی فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی میوه‌های گرد، مانند پرتقال بسیار مفید هستند. با استفاده از فرکانس‌های به‌دست‌آمده و شکل مودهای ارتعاشی، در حمل و نقل واقعی میوه پرتقال می‌توان با استفاده از روش‌های بسته‌بندی مناسب در حمل و نقل از به‌وجود آمدن فرکانس‌های تشدید جلوگیری کرد تا از افت کیفیت میوه کاسته شود.

References

1. Abbaszadeh, R., Rajabipour, A., Sadrnia, H., Mahjoob, M. J., Delshad, M., & Ahmadi, H. (2014). Application of modal analysis to the watermelon through finite element modeling for use in ripeness assessment. *Journal of Food Engineering*, 127, 80-84. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.11.020
2. Ahmadi, E., & Barikloo, H. (2016a). Viscoelastic finite element analysis of the dynamic behavior of apple under impact loading with regard to its different layers. *Computers and Electronics in Agriculture*, *121*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.017
3. Ahmadi, E., & Barikloo, H. (2016b). Mechanical property evaluation of apricot fruits under quasi-static and dynamic loading. *Journal of Agricultural Machinery*, *6*(1), 139-152. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.v6i1.29489
4. Celik, H. K. (2017). Determination of bruise susceptibility of pears (Ankara variety) to impact load by means of FEM-based explicit dynamics simulation. *Postharvest Biology and Technology*, *128*, 83-97. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.015
5. Celik, H. K., Rennie, A. E. W., & Akinci, I. (2011). Deformation behaviour simulation of an apple under drop case by finite element method. *Journal of Food Engineering*, *104*, 293-298. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.020
6. Chen, L., & Opara, U. L. (2013). Texture measurement approaches in fresh and processed foods - A review. *Food*

Research International, *51*, 823-835. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.01.046
7. Coelho, A. L. F., Santos, F. L., Queiroz, D. M., & Pinto, F. A. C. (2016). Dynamic behavior of the fruit-stem-branch system using stochastic finite element method. *Coffee Science*, *11*(1), 1-10. http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/8167
8. Couck, P., Ketelaere, B. De., & Baerdemaeker, J. De. (2003). Experimental analysis of the dynamic, mechanical behavior of a chicken egg. *Journal of Sound and Vibration*, *266*, 711-721. https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00596-0
9. Entwistle, K. (2001). *Basic Principles of the Finite Element Method*. IOM Communications.
10. Fadiji, T., Coetzee, C. J., Berry, T. M., & Opara, U. L. (2019). Investigating the role of geometrical configurations of ventilated fresh produce packaging to improve the mechanical strength– experimental and numerical approaches. *Food Packaging and Shelf*, *20*, 100312. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100312
11. Gao, Y., Song, C., & Rao, X. (2018). Image processing-aided fea for monitoring dynamic response of potato tubers to impact loading. *Computers and Electronics in Agriculture*, *151*, 21-30. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.027
12. Gyasi, S., Fridley, R. B., & Chen, P. (1981). Elastic and viscoelastic Poisson's ratio determination for selected citrus fruits. *Transactions of the ASAE*, *24*(3), 747-0750. https://doi.org/10.13031/2013.34332
13. Gyeong-Won, K., Gab-Soo, Y., & Yasuyuki, S. (2008). Analysis of Mechanical Properties of Whole Apple Using Finite Element Method Based on Three-Dimensional Real Geometry. *Food Science and Technology Research*, *14*(4), 329-336. https://doi.org/10.3136/fstr.14.329
14. He, J., & Fu, Z. F. (2001). *Modal Analysis: Butterworth-Heinemann*. Hoffman, J. D., & Frankel, S. (2001). Numerical methods for engineers and scientists: CRC press.
15. Kabas, O., Celik, H. K., Ozmerzi, A., & Akinci, İ. (2008). Drop test simulation of a sample tomato with finite element method. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *88*, 1537-1541. https://doi.org/10.1002/jsfa.3246
16. Láng, Z. (2006). Dynamic modelling structure of a fruit tree for inertial shaker system design. *Biosystems Engineering*, *93*(1), 35-44. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.09.003
17. Lu, R., Srivastava, A. K., & Ababneh, H. A. A. (2006). Finite element analysis and experimental evaluation of bio yield probes for measuring apple fruit firmness. *Transactions of the ASAE*, *49*, 123-131. https://doi.org/10.13031/2013.20220
18. Mirzaei, R., Minaei, S., Khoshtaghaza, M., & Borghei, M. (2013). Evaluation of natural frequencies apple using finite element modal analysis. *Journal of Agricultural Machinery*, *3*, 48-57. (in Persian).
19. Mizrach, A. (2007). Nondestructive ultrasonic monitoring of tomato quality during shelf-life storage. *Postharvest Biology and Technology*, *46*, 271-274. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.05.012
20. Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Sci.publ, New York, 1986. https://doi.org/10.1002/food.19870310724
21. Namdari Gharaghani, B., Maghsoudi, H., & Mohammadi, M. (2020). Ripeness detection of orange fruit using experimental and finite element modal analysis. *Scientia Horticulturae*, *261*, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108958
22. Salarikia, A., Miraei Ashtiani, S. H., Golzarian, M. R., & Mohammadinezhad, H. (2017). Finite element analysis of the dynamic behavior of pear under impact loading. *Information Processing in Agriculture*, *4*, 64-77. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.12.003
23. Santos, F. L., Queiroz, D. M., Valente, D. S. M., & Coelho, A. L. F. (2015). Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. *Acta Scientiarum Technol*, *37*, 11-17. https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v37i1.19814
24. Seyedabadi, E., Khojastehpour, M., & Sadrnia, H. (2015). Predicting Cantaloupe Bruising Using Non-Linear Finite Element Method. *International Journal of Food Properties*, *18*(9), 1-28. https://doi.org/10.1080/10942912.2014.951892
25. Song, H. Z., Wang, J., & Li, Y. H. (2006). Studies on vibration characteristics of a pear using finite element method. *Journal of Zhejiang University Science*, *7*, 491-496. https://doi.org/10.1631/jzus.2006.b0491
26. Tinoco, H. A., Ocampo, D. A., Pena, F. M., & Sanz-Uribe, J. R. (2014). Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of Coffee arabica L. var. Colombia estimating its geometrical and mechanical properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, *108*, 17-27. https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.06.011
27. Tinoco, H. A., & Peña, F. M. (2018). Harmonic stress analysis on *Coffeaar´abica* L. Var. Colombia fruits in order to simulate the selective detachment. *A Finite Element Analysis*, *94*(2), 163-174. https://doi.org/10.1177/0037549717738068
28. Villibor, G. P., Santos, F. L., Queiroz, D. M., Khoury Junior, J. K., & Pinto, F. A. C. (2019). Dynamic behavior of coffee fruit-stem system using modelling of flexible bodies. *Computers and Electronics in Agriculture*, *166*, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105009
29. Wang, F., Ma, S., Wei, W., Zhang, Y., & Zhang. Z. (2017). Frequency sweep test and modal analysis of

watermelon during transportation. *International Journal of Food Engineering*, *13*(5). https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0362

30. Yousefi, S., Farsi, H., & Kheiralipour, K. (2016). Drop test of pear fruit: Experimental measurement and finite element modelling. *Biosystems Engineering*, *147*, 17-25. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.03.004
31. Zhang, H., Wu, J., Zhao, Z., & Wang, Z. (2018). Nondestructive firmness measurement of differently shaped pears with a dual-frequency index based on acoustic vibration. *Postharvest Biology and Technology*, *138*, 11-18. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.12.002